

# Mond und Planeten im Lichte der Raumfahrt

Dieminger, Walter

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 27, 1977,  
S.257-280



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

## Mond und Planeten im Lichte der Raumfahrt

Von Walter Dieminger

Die hervorragenden Leistungen von Carl Friedrich Gauß in der Mathematik und seine Pioniertätigkeit in der Landesvermessung lassen gelegentlich seine Beiträge auf anderen Zweigen der Naturwissenschaften etwas in den Hintergrund treten. Wir verdanken ihm aber auch eine äußerst präzise und elegante Methode der Bestimmung der Planetenbahnen und grundlegende Erkenntnisse des erdmagnetischen Feldes. Planetenbeobachtungen konnten zu Gauß' Zeiten und bis zur Mitte dieses Jahrhunderts nur auf optischem Wege angestellt werden, und die Frage, ob auch andere Körper des Sonnensystems, wie der Mond und die Planeten, magnetische Felder besitzen, blieb ebenso lange ein Gegenstand reiner Spekulation. Wesentliche Fortschritte brachte erst die Raumfahrt, d.h. die Erforschung der hohen Atmosphäre und des interplanetaren Raumes mit Hilfe von raketengetriebenen Fahrzeugen. Hierüber will ich im Folgenden berichten. Um den Fortschritt deutlich zu machen, will ich jeweils den Stand der Erkenntnis vor dem Beginn des Raumfahrtzeitalters mit dem gegenwärtigen Stand vergleichen.

Beginnen wir mit dem Mond. Wegen seiner großen Nähe hat er schon immer die besondere Aufmerksamkeit der Menschen erregt. Aber es gab im 20. Jahrhundert wohl niemand mehr, der die Mythen vom Mann im Mond ernst nahm oder daran glaubte, daß er der Wohnort der Toten sei oder die Gefilde der Seligen beherberge. Mit entsprechenden Fernrohren konnte man Objekte von etwa 100 m Durchmesser noch auflösen. Man erkannte große flache Vertiefungen, die man Meere nannte, obwohl man bald merkte, daß sie keine Wasserflächen sind; man konnte deutlich Ringgebirge bis zu einigen 100 km Durchmesser und Ringwälle bis zu 8000 m Höhe lokalisieren. Man gab ihnen Namen bekannter Astronomen. Die Höhe bestimmte man übrigens aus der Schattenlänge, wie sich später herausstellte, mit großer Genauigkeit. Über die Entstehung der Ringgebirge, auch Krater genannt, stritten sich die Fachleute: Die einen glaubten, daß es sich um erloschene Vulkane handelt, die anderen deuteten sie als Einschlagkrater von Meteoriten, wie wir sie auf der Erde kennen, z. B. den Meteorokrater in Arizona mit etwa 1800 m Durchmesser oder das Ries mit etwa 50 km Durchmesser. Man war sich darüber klar, daß es höchstens Spuren von Wasser auf dem Mond gibt und daß die Temperatur zwischen  $+130^{\circ}\text{C}$  auf der sonnenbeschienenen Seite und  $-150^{\circ}\text{C}$  auf der Nachtseite schwankt. Umstritten war die Oberflächenbeschaffenheit: War es fester Boden oder eine tiefe Staubschicht? Eine weitere Streitfrage betraf die Entstehung des Mondes: War er etwa gleichzeitig mit der Erde als selbständiger Himmelskörper entstanden, z. B. durch Akkumulierung der Materie im interplanetaren Raum oder hatte er sich erst später von der Erde getrennt, wobei das tiefe Loch des Pazifischen Ozeans entstanden war? Unbekannt war natürlich die Rückseite des Mondes, der uns ja immer die gleiche Seite zukehrt. Allerdings konnte man wegen der Libration des Mondes etwas mehr als die Hälfte, nämlich 59% der Oberfläche beobachten.

Den Sturm auf den Mond eröffnete die Sowjetunion 1959 mit Luna 1–3. Die Hauptsensation waren die ersten Bilder von der Rückseite des Mondes, die von Luna 3 gemacht und per Funk zur Erde übertragen wurden. Wenn auch die Bilder nicht sehr scharf waren, so zeigten sie doch, daß die Rückseite des Mondes im wesentlichen die gleiche Struktur wie die Vorderseite hat. Die Hoffnungen der Unentwegten, die immer noch auf irgend etwas Phantastisches gewartet hatten, wurden endgültig begraben. Im übrigen waren die Bilder noch so unvollkommen, daß Fehlinterpretationen von Einzelheiten nicht ausblieben. Heute wissen wir auf Grund der vielen Fotos über die Rückseite des Mondes so gut Bescheid wie über die Vorderseite (Bild 1). Die Amerikaner hatten zunächst mit ihren Ranger-Sonden, die vor der harten Landung Bilder übertragen sollten, viel Pech; erst die letzten drei Ranger erbrachten in den Jahren 1961–65 ausgezeichnete Fotos, die mit der Annäherung der Sonde an die Mondober-



Bild 1 Typische Struktur auf der Rückseite des Mondes (Apollo 11).

fläche immer mehr Details zeigten. Den nächsten Schritt taten wieder die Russen im Januar 1966 mit einer weichen Landung von Luna 9. Ein sehr wesentliches Ergebnis war die Feststellung, daß die Mondoberfläche nicht von einer meterdicken Staubschicht bedeckt ist, die naturgemäß erhebliche Probleme für die Landung und die Fortbewegung auf dem Mond bedeutet hätte. Im Dezember 1966 lieferte dann die weichgelandete Sonde Luna 13 sehr gute Bilder von der Landestelle aus. Eine vollständige Kartierung des Mondes ermöglichten dann die 5 Orbitersonden der USA, die ab 1966 den Mond umkreisten und ganz hervorragende Fotos zur Erde übertrugen. Ich erinnere mich an eine internationale Tagung Ende der 60er Jahre, auf der ein großer Saal mit segmentartig zusammengesetzten Vergrößerungen dieser Fotos ausgelegt war. Man konnte die Illusion haben, wie ein moderner Gulliver mit Siebenmeilentiefeln über den Mond dahinzuschreiten.

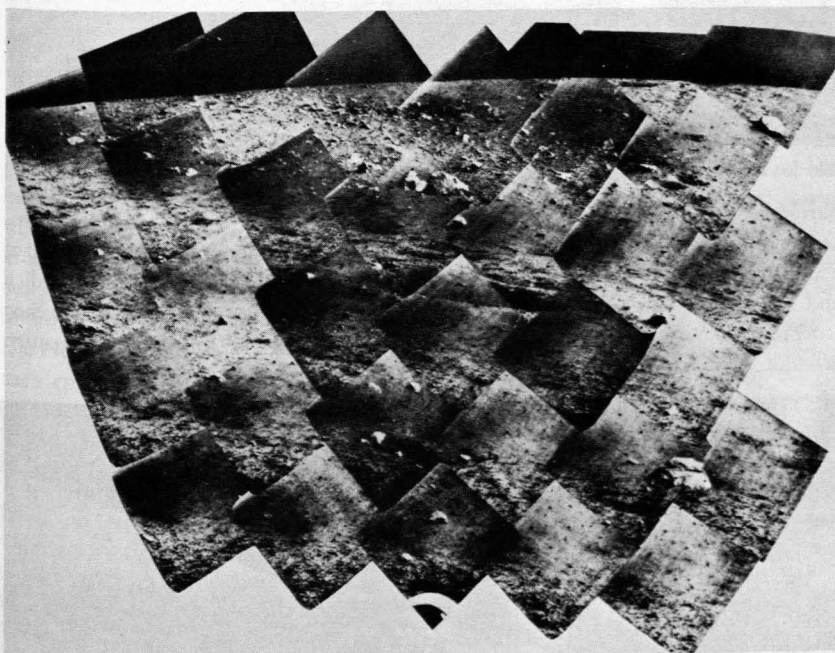


Bild 2 Panorama des Mondes von der Landestelle von Surveyor 1 aus.

Eine wichtige Voraussetzung für die späteren Mondlandungen waren die weichen Landungen der Surveyor-Sonden, die unübertroffen gute Aufnahmen von der Umgebung der Landeplätze lieferten (Bild 2). Surveyor 3 zog sogar mit einer Schaufel einen flachen Graben. Man kann ohne Übertreibung sagen, daß viele Probleme bereits gelöst waren, als im Juli 1969 die Mondlandefähre Eagle von Apollo 11 mit den Amerikanern Armstrong und Aldrin weich auf der Mondoberfläche aufsetzte. Apollo 12 landete im



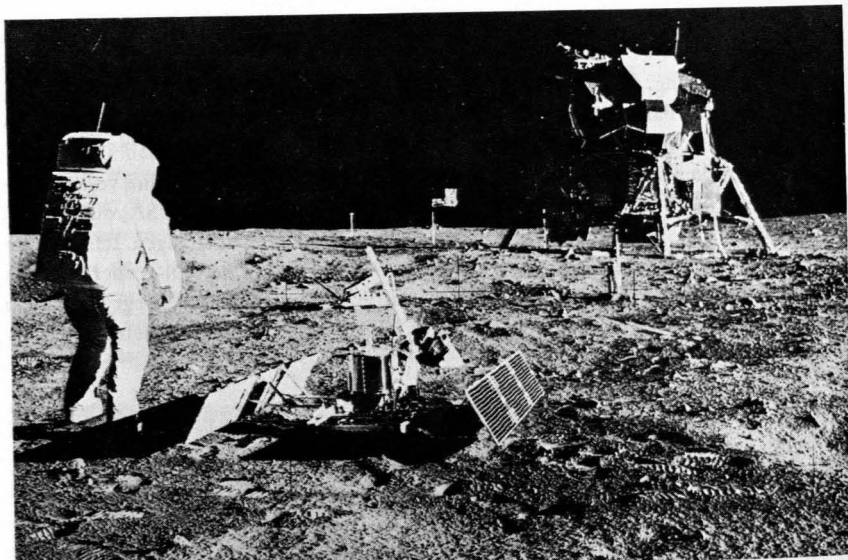


Bild 3 Apollo 11 landet in der Nähe von Surveyor 3.

November 1969 so nahe bei den Überresten von Surveyor 3 (Bild 3), daß die Astronauten Conrad und Bean einen Spaziergang dorthin machen konnten. Über den Ablauf und das Beobachtungsprogramm dieser Apollo-Mission ist soviel in den Massenmedien und in Fachveröffentlichungen berichtet worden, daß ich hier nicht darauf eingehen möchte. Nur noch ein besonders schönes Foto von Apollo 17 mit dem Astronauten Schmidt links vorn und dem Mondauto im Mittelgrund (Bild 4).

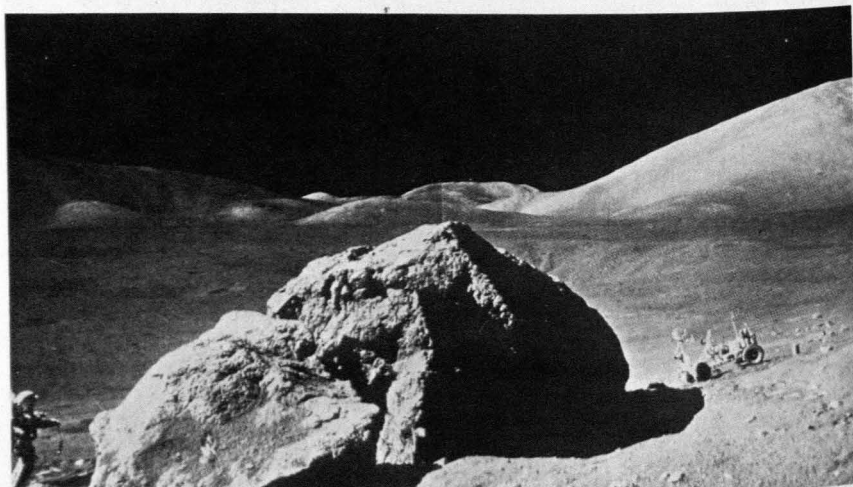


Bild 4 Mondoberfläche mit Astronaut Schmidt und Mondauto (Apollo 17).

Welches sind nun die wesentlichen Ergebnisse der Monderkundung: Es hat sich bestätigt, daß der Mond keine Atmosphäre hat und daß seine Oberfläche der extra-terrestrischen Strahlung in voller Stärke ausgesetzt ist, sei es, daß sie von der Sonne oder aus den Tiefen des Weltraums kommt. Er hat auch kein merkliches Magnetfeld, das die geladenen Teilchen aus dem Weltraum ablenken könnte. Damit ist der Mond ein hervorragender Standort für Beobachtungen aller Art, die auf der Erde durch die Anwesenheit der Lufthülle und des Erdmagnetfeldes beeinträchtigt werden. Die Astronomen können dort frei von Szintillation und Refraktion beobachten. Das so einfache Experiment des Sonnensegels hat exakte Daten über die Zusammensetzung des Sonnenwindes gebracht. Die großen und kleinen Krater sind eine unverwischbare Dokumentation der Meteoriten, die im Lauf von Milliarden Jahren die Oberfläche des Mondes getroffen haben. Leben auch in der niedrigsten Form gibt es nicht. Auch von früherem Leben gibt es keine Spuren. Die früher indirekt gemessenen Temperaturwerte wurden bestätigt. Wasser hat auf dem Mond Seltenheitswert. Es ist höchstens in Spuren im Gestein enthalten. Oberflächenwasser gab es augenscheinlich nie und vermutlich auch kein Untergrundeis.

Nicht entschieden ist die Frage, ob alle Krater Meteoriteneinschläge sind. Vermutlich sind einige echte Vulkane. Die Mehrzahl stammt aber von Meteoriten. Ganz tot ist der Mond nicht. Die seismischen Stationen, die man auf dem Mond abgesetzt hat, melden kleinere Mondbeben. Doch sind diese so schwach, daß man sie nicht fühlen würde, selbst wenn man genau über dem Epizentrum stünde. Offenbar ist die Mondkruste mit einer Dicke von schätzungsweise 800 km zu fest, als daß sie von dem Magma des geschmolzenen Kernes unter Vulkanbildung durchbrochen werden könnte. Der Mond ist also geologisch tot. Noch diskutiert wird über die Struktur der Mondkruste. Die Probesprengungen haben eine erstaunliche Elastizität ergeben. Die Kruste schwingt nach einem Stoß fast wie eine Glocke noch bis zu 45 min nach. Die Seismiker sind bemüht, passende Modelle für den Aufbau der Kruste zu berechnen. Denn Tiefbohrungen hat man bisher noch nicht anstellen können.

Besonderes Interesse galt der Art und dem Alter der Gesteine auf dem Mond. Man erwartete, wenn nicht eine Entscheidung, so doch wichtige Hinweise auf die Entstehung des Systems Erde-Mond. Es gibt hierüber zwei Klassen von Hypothesen: Solche, die eine Abtrennung des Mondes von der Erde annehmen und solche, die eine unabhängige Entstehung behaupten. Die Abtrennungshypothesen nehmen entweder an, daß der Mond als fester Brocken sich von der Erde losgerissen hat, oder daß er als Ring loser Materie sich durch Zentrifugalkräfte vom Äquator abgelöst hat. Für die erste Hypothese sprach, daß auf der Mondoberfläche die gleichen Gesteine wie auf der Erde gefunden wurden; dagegen spricht das Alter, das mit max. 4,7 Milliarden Jahren dem Alter der ältesten Gesteine auf der Erde entspricht. Hätte sich der Mond erst nach der Bildung der festen Erdkruste losgerissen, so müßten seine Gesteine ein geringeres Alter zeigen, nämlich den Erstarrungszeitpunkt der Mondoberfläche. Gegen diese Hypothese spricht auch, daß der Energieverbrauch zur Überwindung der Reibungskräfte so groß gewesen wäre, daß die verminderte Umdrehungsgeschwindigkeit nicht mehr zur zentrifugalen Abtrennung ausgereicht hätte. Gegen die Abtrennung eines Rings loser Materie

spricht, daß dazu eine  $2\frac{1}{2}$  mal so große Umdrehungsgeschwindigkeit der Proto-Erde notwendig gewesen wäre.

Bei den Hypothesen über eine unabhängige Entstehung des Mondes gibt es zwei Varianten: Entstehung in Erdnähe und Einfang. Gegen die Entstehung in Erdnähe spricht der erhebliche Unterschied in der Dichte: Warum hat der Mond nur eine Dichte von 3,3 gegenüber 5,5 der Erde? Gegen den Einfang spricht, daß ein solcher Prozeß außerordentlich unwahrscheinlich ist. Augenblicklich scheint die Mehrzahl der Fachleute der letzten Hypothese zuzuneigen, weil sie die geringe Wahrscheinlichkeit immer noch den inneren Widersprüchen der übrigen Hypothesen vorziehen.

Faßt man zusammen, so kann man sagen, daß der Mond wohl als Standort für Observatorien, aber nicht als Zufluchtsort für eine Aussiedlung von Teilen der Erdbevölkerung infrage kommt. Gewinnung von Mineralien dürfte wegen der enormen Transportkosten nur in Sonderfällen diskutabel sein.

### Planeten

Wenden wir uns nun den Planeten zu und zwar in der Reihenfolge ihres Abstandes, nämlich Merkur, Venus, Mars und Jupiter. Dies entspricht allerdings nicht der Reihenfolge ihrer näheren Untersuchung. Hier müßte die Reihenfolge Venus, Mars, Jupiter, Merkur heißen. In allen Fällen handelt es sich um Erkundungen an Bord unbemannter Fahrzeuge. Eines Menschen Fuß hat noch keinen Planeten betreten. Die lange Flugdauer würde enorme Probleme aufwerfen.

Beginnen wir mit dem Merkur; er hat nur etwa  $\frac{1}{18}$  der Erdmasse, läuft auf einer merklich elliptischen Bahn in rd. 88 Tagen einmal um die Sonne und dreht sich innerhalb 58,6 Tagen einmal um sich selbst. Das ergibt, daß ein Merkurtag etwa 176 mal so lang ist wie ein Erdtag und Merkur dabei 2 mal um die Sonne läuft. Der Abstand von der Sonne ist rd. 0,39 Erdabstände. Da er maximal nur  $28^\circ$  von der Sonne absteht, ist seine optische Beobachtung schwierig. Außerdem hat er immer dann „Neumerkur“, ist also unsichtbar, wenn er seinen kleinsten Abstand von der Erde hat.

Die optische Beobachtung hatte ergeben, daß es auf dem Merkur keine Wolken und keine Atmosphäre gibt. Die Bodenstruktur sollte ähnlich der des Mondes sein. Diese Ergebnisse wurden durch die Raumfahrt bestätigt. Am 19. März 1974 lieferte Mariner 10 bei einem Vorbeiflug in 260 000 km mehr als 1000 gestochen scharfe Bilder. Man hatte übrigens Glück. Wenig später trat ein Kurzschluß im Energieaufbereitungssystem auf. Die Auswertung der Bilder (Bild 5) ergab tatsächlich eine große Ähnlichkeit mit der Mondoberfläche. Allerdings ist die Zahl der Maria wesentlich kleiner, die Kraterformen zeigen mehr Varianten und Erosionserscheinungen. Es gibt zerfurchte Strukturen und z. B. eine 60 km lange Fließfront. Die Temperaturen sind jedem Leben abhold; auf der Nachtseite wurden  $-140^\circ\text{C}$ , auf der Tagseite  $+225^\circ\text{C}$  gemessen. An den Punkten, über denen die Sonne senkrecht steht, werden  $+450^\circ\text{C}$  vermutet. Das Magnetfeld ist mit 400  $\gamma$  am Äquator nur etwa  $\frac{1}{100}$  des Erdfeldes. Der 2. und 3. Vorbeiflug am Merkur in 48 000 bzw. 2600 km Abstand lieferten weitere hervorragend scharfe Bilder (Bild 6). Weitere Details wurden festgestellt, z. B. strahlenförmige Einschlagspuren eines Meteoriten jüngerer Zeit, eine Verwerfung von 300 km Länge und

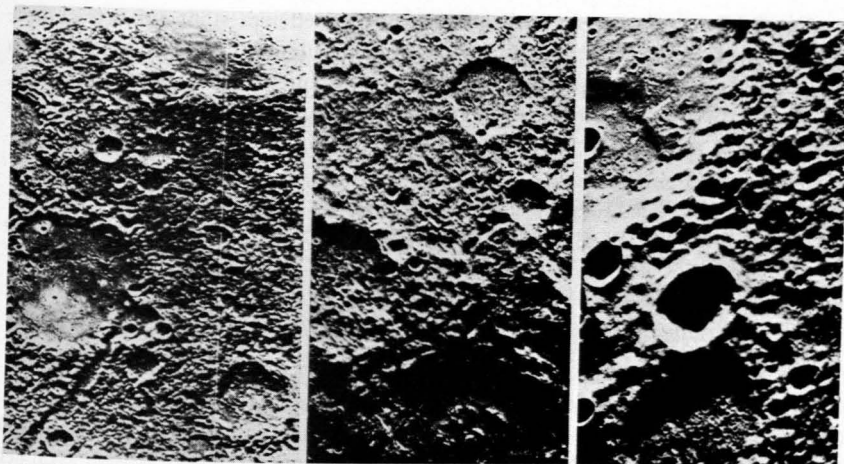


Bild 5 Oberfläche des Merkur (Mariner 10, 1. Vorbeiflug).

3000 m Höhe, ein Großkrater von 1300 km Durchmesser und ein Krater von mindestens 50 km Durchmesser, der durch den Einschlag eines Meteoriten entstanden sein muß.

Die Entwicklungsgeschichte des Merkur ist offenbar der des Mondes sehr ähnlich: Nach der Kondensation aus interplanetarischer Materie folgte eine Phase mit starker Erwärmung und Schmelzung der Oberfläche durch Meteoriteneinschläge. Nach Abkühlung und Erstarren der Oberfläche durchbrach Magma aus dem inzwischen durch radioaktive Prozesse aufgeheizten Kern die Kruste und füllt die großen Einschlagbecken. Die Erosion nach Abschluß dieser Phase ist aber offenbar wegen der großen Temperaturunterschiede stärker als auf dem Mond.

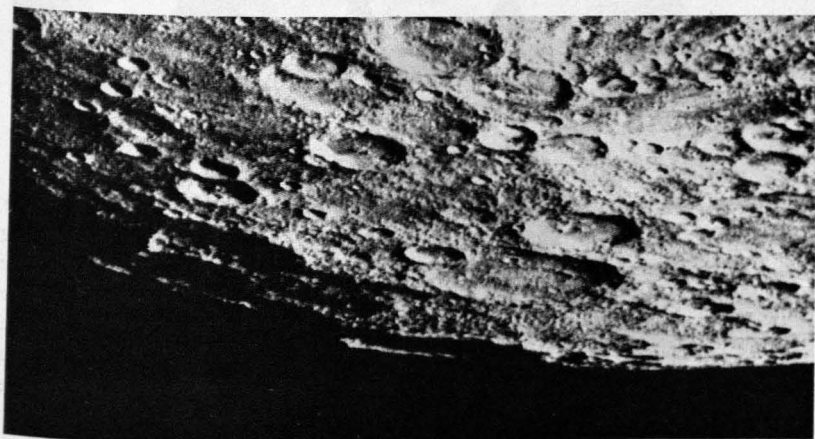


Bild 6 Polgegend des Merkur (Mariner 10, 2. Vorbeiflug).



Die Erklärung des, wenn auch schwachen, Magnetfeldes stößt auf beträchtliche Schwierigkeiten: Der Mechanismus, den man heute für die Erde annimmt, nämlich elektrische Ströme in dem gut leitenden äußeren Kern, funktioniert beim Merkur nicht, da die Rotation viel zu langsam ist. Vielleicht erbringt die weitere Erforschung des Magnetfeldes von Merkur neue Gesichtspunkte für die Entstehung des Erdmagnetfeldes.

Merkur hat wegen der Sonnennähe und der daraus resultierenden hohen Temperatur wohl nie als bewohnbar gegolten. Seine nähere Erforschung brachte vorläufig keine unerwarteten Ergebnisse.

### Venus und Mars

In viel stärkerem Maße als Merkur haben Venus und Mars die Phantasie der Menschen beschäftigt, umso mehr als ihre Beobachtung von der Erde aus sehr viel leichter ist als bei Merkur. Außerdem sind sie im Durchmesser und im Abstand von der Sonne mit unserem Mutterplaneten vergleichbar. Venus als 2. Planet des Systems hat einen Abstand von 72% des Erdbabstandes, ihr Durchmesser ist nur 2% geringer als der der Erde. Die relativ strukturlose Oberfläche ohne bleibende Konturen deutete auf eine permanente Wolkenschicht hin, die eine bis in die Zeit der Raumfahrt unzugängliche Landschaft verhüllte (Bild 7). Der Mars, der 4. Planet, ist etwa  $1\frac{1}{2}$  mal so weit von der

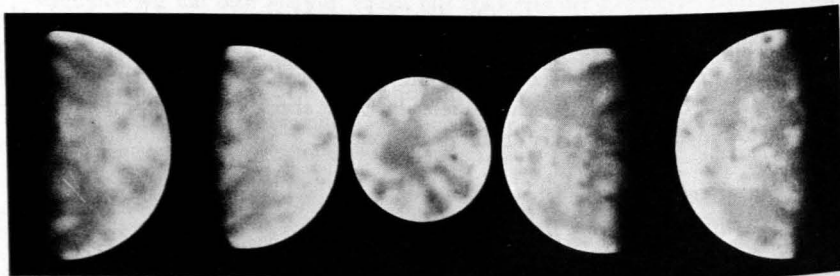


Bild 7 Phasen der Venus von der Erde aus beobachtet (Pic du Midi).

Sonne entfernt wie die Erde, sein Durchmesser ist etwa halb so groß wie derjenige der Erde. Mächtig wurde die Phantasie der Menschen angeregt, als nach der Entwicklung leistungsfähiger Fernrohre zu Ausgang des Mittelalters Strukturen entdeckt wurden, die man als Kanäle bezeichnete und die man für das Werk intelligenter Wesen hielt. Die älteren unter Ihnen werden sich noch an die Romane erinnern, in denen Marsmenschen die Hauptrolle spielten. Sowohl bei Venus als bei Mars sind die hochgespannten Erwartungen bitter enttäuscht worden, beide sind unbewohnbare, wüstenartige Himmelskörper.

Betrachten wir zunächst den Gang der Erforschung bei der Venus.

### Venus

Die Umlaufzeit um die Sonne ist mit 224 Tagen etwas kürzer als die der Erde. Über die Rotationsdauer konnte man auf Grund astronomischer Beobachtungen nichts Genaues aussagen. Die Vermutungen lagen bei einigen Tagen. Heute weiß man, daß eine Umdrehung um die eigene Achse länger dauert als ein Umlauf um die Sonne, nämlich 243 Erdtage. Das führt zusammen mit der Tatsache, daß sich Venus „verkehrt“ herum dreht, dazu, daß auf der Venus zwischen zwei Sonnenaufgängen 118 Erdtage vergehen und ein Venusjahr nicht ganz zwei Venustage dauert. Die Temperatur der Wolkenoberschicht schwankt nach den früheren Beobachtungen zwischen  $-60^{\circ}\text{C}$  und  $-25^{\circ}\text{C}$ . In der Atmosphäre der Venus schien Kohlendioxid vorzuherrschen, Spuren von Stickstoff waren nachweisbar, Wasser und Wasserstoff wurden vermutet.

Noch vor 50 Jahren herrschte die Meinung vor, daß unter der Wolkenhülle eine angenehme, gemäßigte Temperatur herrsche und sich dort Meere, Sümpfe und eine üppige Vegetation ausbreite. 1962 glaubten amerikanische Forscher noch, daß die oberen Wolken ganz aus Wasserdampf bestünden, und daß die gesamte Oberfläche mit Wasser bedeckt sei, in dem das Kohlendioxid vollständig absorbiert sei; also ein gewaltiger Ozean aus „Mineralwasser“. Primitive Formen des Lebens hielten sie für möglich, vielleicht von der Art, wie sie im Präcambrium auf der Erde zu finden waren. Andere Forscher glaubten an eine öde, sengend heiße Staubwüste.

Die Raumfahrt erkundung begann mit einer Reihe von Fehlschlägen. Beim 1. Versuch der UdSSR im Februar 1961 brach die Funkverbindung ab. Auch Mariner 1 der Amerikaner im Juli 1962 war ein Versager. Im August 1963 gelang Mariner 2 ein Vorbeiflug in rd. 35 000 km Entfernung, bei dem die Temperatur der Oberfläche gemessen wurde. 3 mal Pech hatten die Russen mit Zond 1 im April 1964, mit Venera 2, die wohl im Februar 1966 in rd. 24 000 km Entfernung an der Venus vorbeiflog, aber keine brauchbaren Informationen lieferte, und mit Venera 3, die am 1.3.1966 auf der Venus zerschellte. Dagegen glückte Venera 4 im Oktober 1967 eine weiche Landung. Gleichzeitig flog Mariner 5 an der Venus vorbei. Daraus ergaben sich interessante Vergleichsmöglichkeiten, auf die ich gleich noch zurückkommen werde. Große Erfolge waren die Fallschirmlandungen von Venera 5 und 6 im Jahr 1969 und die weichen Landungen von Venera 9 und 10 im Oktober 1975. Letztere übertrugen etwa 1 h lang nach der Landung über Orbiter, die in großer Höhe die Venus umkreisten, Meßwerte und Aufnahmen der Umgebung (Bild 8). Dann hatten sich die Geräte trotz entsprechender Maßnahmen soweit erhitzt, daß sie ihren Betrieb einstellten.

Die Ergebnisse aller dieser Unternehmen zerstörten die Illusion von der üppigen Vegetation vollständig. Mariner 2 maß etwa  $400^{\circ}\text{C}$  auf der Oberfläche. Die Ergebnisse von Venera 4 und Mariner 5 zeigten zunächst unerklärliche Unterschiede. Die Erklärung bestand darin, daß Venera 4 gar nicht bis zur Oberfläche gemessen hatte, sondern schon in erheblicher Höhe unerwartet hohem Druck zum Opfer gefallen war. Dasselbe Schicksal erlitt Venera 6. Die neuesten Messungen von Venera 10 ergaben einen Druck von 93 bar = 84 atm. und eine Oberflächentemperatur von  $465^{\circ}\text{C}$  (Bild 9).

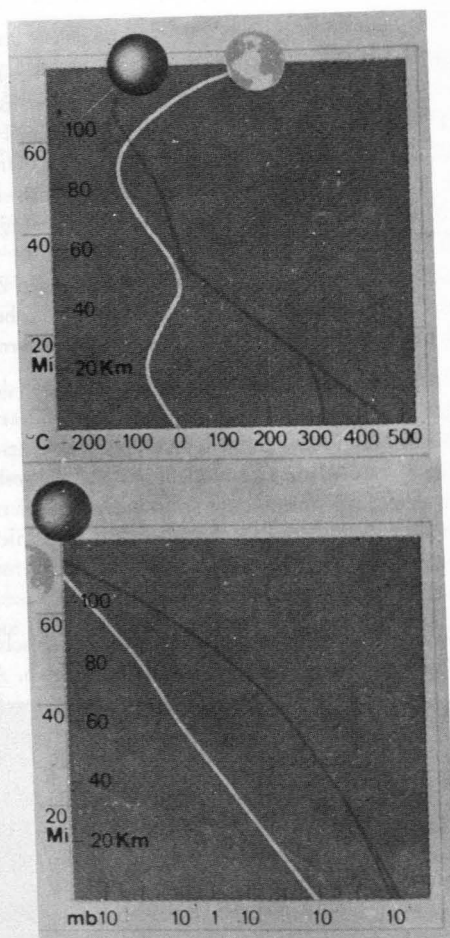


Bild 8 Druck und Temperatur bis 120 km Höhe für Venus und Erde.

Unter diesen Umständen ist an eine bemannte Landung nicht zu denken. Interessant sind die Daten der Wolkendecke. Sie besteht aus einem vielschichtigen System zwischen 30 und 40 km Höhe und hat eine Gesamtdicke von 22 km. Sie ist aber nicht so dicht wie man früher annahm. An Stelle des erwarteten Dämmerlichtes herrscht auf der Oberfläche helle Beleuchtung. Venera 9 landete in einem felsübersäten geologisch jüngeren Gebiet, Venera 10 in einem geologisch älteren Hügelland. Staub und Sand wurden nicht beobachtet. Über die Wolkenstruktur gab der Vorbeiflug von Mariner 10, der auf dem Wege zum Merkur die Venus am 5. Februar 1974 in rd. 6000 km Abstand passierte, interessante Aufschlüsse: UV-Bilder (Bild 10) ließen eine spiralige Struktur der Wolken erkennen: Eine warme Äquatorialströmung mit einer zirrusartigen Wolkenströmung zu den Polen hin. Daß kein schwerer Wasserstoff in der Atmosphäre der Venus entdeckt



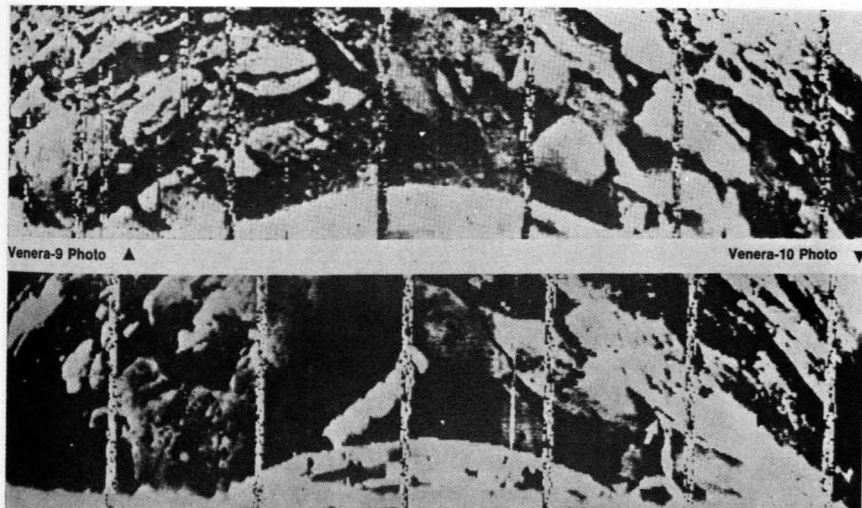


Bild 9 Umgebung der Landestelle von Venera 9 und 10.

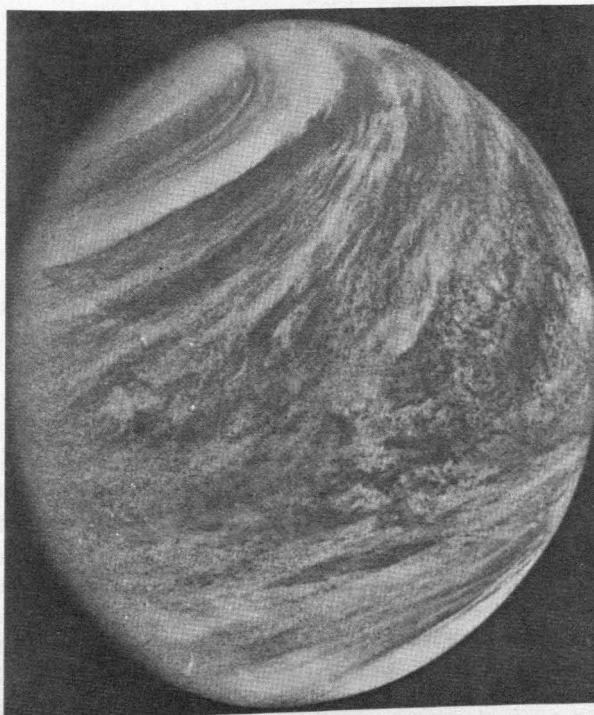


Bild 10 UV-Aufnahme der Wolkenoberseite der Venus (Mariner 10).

werden konnte, deutet darauf hin, daß aller Wasserstoff dort aus dem Sonnenwind stammt. Wolkengeschwindigkeiten von 300 km/h wurden gemessen.

Bei der Erforschung der Venus haben sich Russen und Amerikaner in die Arbeit geteilt. Während die ersteren durch Landungen Aufschlüsse über die Oberflächenstruktur erbrachten, konzentrierten sich die letzteren auf die Atmosphäre der Venus. Hier sind offenbar noch mehr Rätsel zu lösen, als bei der festen Venus.

### Mars

Vor dem Raumfahrtzeitalter war der Erkenntnisstand etwa folgender: Die Umlaufdauer um die Sonne beträgt 687 Erdtage. Die Umdrehungszeit 24 h 37 m 22,7 s. Die mittlere Temperatur der Oberfläche wurde zu  $-15^{\circ}\text{C}$  bestimmt mit einer Variation zwischen  $-85$  und  $+15^{\circ}\text{C}$ . Die Atmosphäre mußte viel weniger dicht als die der Erde sein und hauptsächlich aus Kohlendioxid bestehen mit kleinen Mengen Wasserdampf und Sauerstoff. Zeitweise schienen dünne Wolken zu existieren. Mit Hilfe optischer Teleskope konnte man Gebiete mit rötlich-ockergelber Farbe, die man als Festland deutete, und solche mit blauer bis grünlich-blauer Farbe, die man als Meere bezeichnete, unterscheiden. Die Abwesenheit von Chlorophyll schloß die Existenz von grünen Pflanzen aus. Dagegen vermutete man, daß niedere Pflanzen in den sog. Meeren existieren. Auffallend waren helle Flecken in den Polgegenden (Bild 11), die sich mit der Jahreszeit ändern und die als Kalotten aus Eis oder  $\text{CO}_2$ -Schnee gedeutet wurden.

Auch die Erforschung des Mars mit Raumfahrzeugen begann mit Fehlschlägen: Bei der ersten Sonde der UdSSR am 1.11.1962 riß die Funkverbindung in 106 Mio. km ab, beim Mariner 3 der USA versagte am 5.11.1964 die Steuerung. Dagegen war Mariner 4 ein voller Erfolg. Der Vorbeiflug ergab 21 Aufnahmen mit guter Qualität. Außerdem brachte ein sog. Okkultationsexperiment wichtige Erkenntnisse über die Atmosphäre des Mars. Dieses Experiment beruht darauf, daß man die Amplitude und Phase eines Senders beobachtet, der mit konstanter Frequenz von Bord der Sonde sendet. Solange die Welle im Vakuum läuft, dreht sich die Phase um  $2\pi = 360^{\circ}$ , wenn die Sonde sich um eine Wellenlänge vom Beobachter entfernt. Läuft die Welle dagegen in einem Medium, dessen Brechzahl vom Vakuum abweicht, so wird die Phase schneller oder langsamer gedreht. Der Kurs von Mariner 4 war nun so gelegt, daß er hinter dem Mars vorbeiging. Dabei mußte kurz vor der Okkultation der Funkstrahl beträchtliche Wege zunächst durch höhere und später tiefere Teile der Marsatmosphäre zurücklegen. Die sehr delikate Auswertung, die eine außerordentliche Genauigkeit erfordert, ergab die Existenz einer Ionosphäre und auch einer Troposphäre auf dem Mars. Ähnliche Untersuchungen ergaben auch bei Venus deutliche Effekte. Die Venus-Ionosphäre reicht allerdings wegen der viel größeren Dichte ihrer Atmosphäre viel höher als die des Mars.

Besonders erfolgreich waren Mariner 6 und 7, die am 30.7. bzw. 4.8.1969 den Mars passierten und ausgezeichnete Bilder zur Erde funkten (Bild 12). Die Überraschung bestand darin, daß der Mars ähnlich wie der Mond von Kratern übersät ist. Generell kann man auf den Aufnahmen 3 Gebiete unterscheiden: 1.) Krater, 2.) ein chaotisches

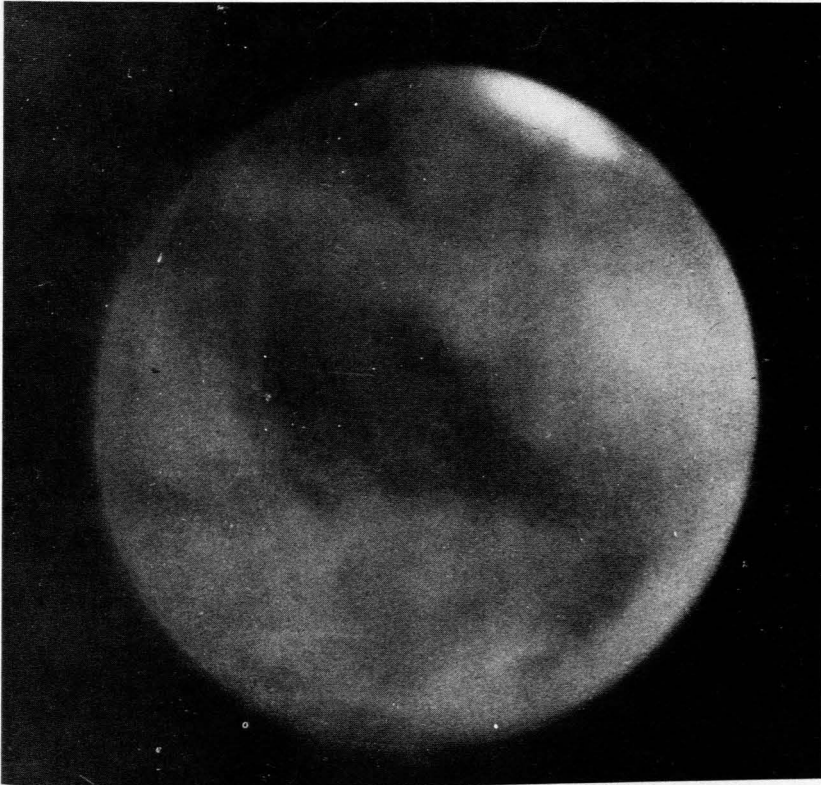


Bild 11 Mars von der Erde aus (Mt. Wilson).

Durcheinander von Höhen und Tälern und 3.) ein nahezu strukturloses Gebiet, das man „Hellas“ nannte. Durch Radarmessungen wurde festgestellt, daß die helleren und dunkleren Gebiete keine eindeutige Beziehung zur Höhenlage haben; beide können Erhebungen oder Senken sein. Die Vulkane auf dem Mars haben z.T. gewaltige Dimensionen, z. B. Olympus Mons B hat einen Kraterdurchmesser von 65 km; eine Basis von 660 km und eine Höhe von 25 km. Einen Teil der Eiskalotte am Südpol und ihrer Umgebung zeigt Bild 13.

Die Atmosphäre sieht nicht ganz so aus, wie man früher angenommen hatte (Bild 14). Der Druck beträgt nur 6–13 mbar anstatt der vermuteten 85 mbar, und die Elektronendichte der Ionosphäre ist nur  $\frac{1}{6}$  der vorausgerechneten. Ein Magnetfeld von merklicher Stärke wurde ebensowenig wie auf der Venus gefunden. Unsere beiden Nachbarplaneten besitzen daher auch keine Magnetosphäre. Welchen enormen Unterschied das bedeutet, zeigt ein maßstablicher Vergleich (Bild 15). Während die Erde von einem höchst interessanten Mantel umgeben ist, der auf der Sonnenseite etwa 60 000 km und auf der Nachtseite bis über die Mondbahn hinausragt, gibt es auf den beiden

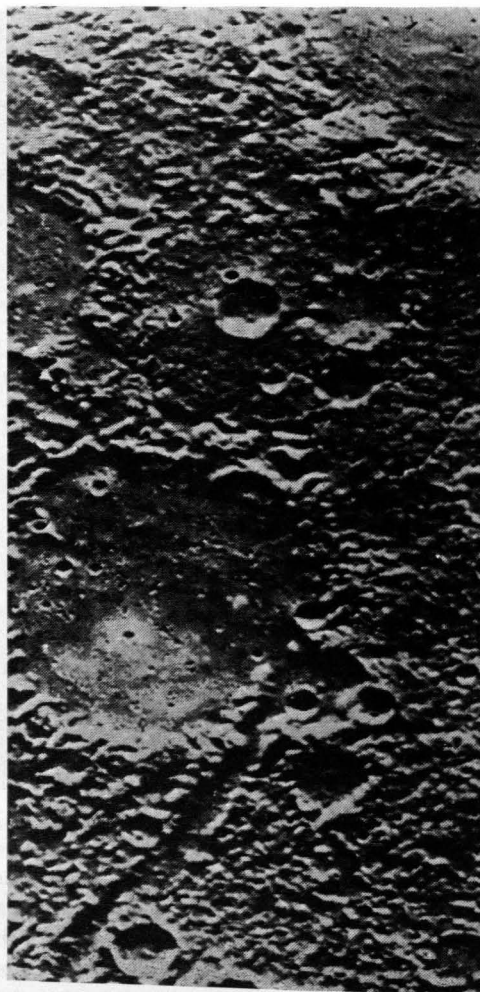


Bild 12 Oberfläche des Mars (Aufnahmefeld  $140 \times 320$  km, Mariner 7).

anderen Planeten nur eine Ionosphäre, die bei Venus etwa 600 km und bei Mars 200 km hoch reicht. Immerhin genügen diese Schichten, um die Oberfläche von schädlicher UV- und Röntgenstrahlung abzuschirmen.

Im August bzw. September 1976 sind nach einer Flugzeit von 10 Monaten die beiden Viking-Landegeräte auf dem Mars eingetroffen und haben wertvolle Informationen geliefert. Eine Aufnahme von unterwegs, und zwar von Viking I ca. 1 Monat vor dem Eintreffen, zeigt Bild 16. Die übertragenen Bilder von den Landestellen zeigen, daß es sich dort nicht um Sandwüsten, sondern um von Steinen übersätes, leicht welliges Gelände handelt (Bild 17). Die Bodenproben ergaben an beiden Stellen die gleiche



Bild 13 Gegend des Südpols vom Mars (Aufnahmefeld  $1200 \times 1500$  km, Mariner 7).

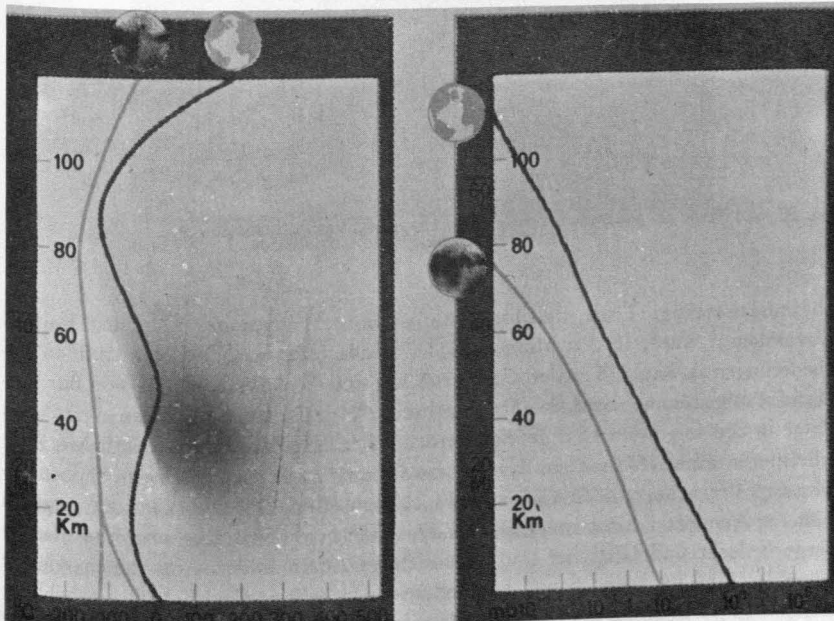


Bild 14 Druck und Temperatur bis 120 km Höhe für Mars und Erde.



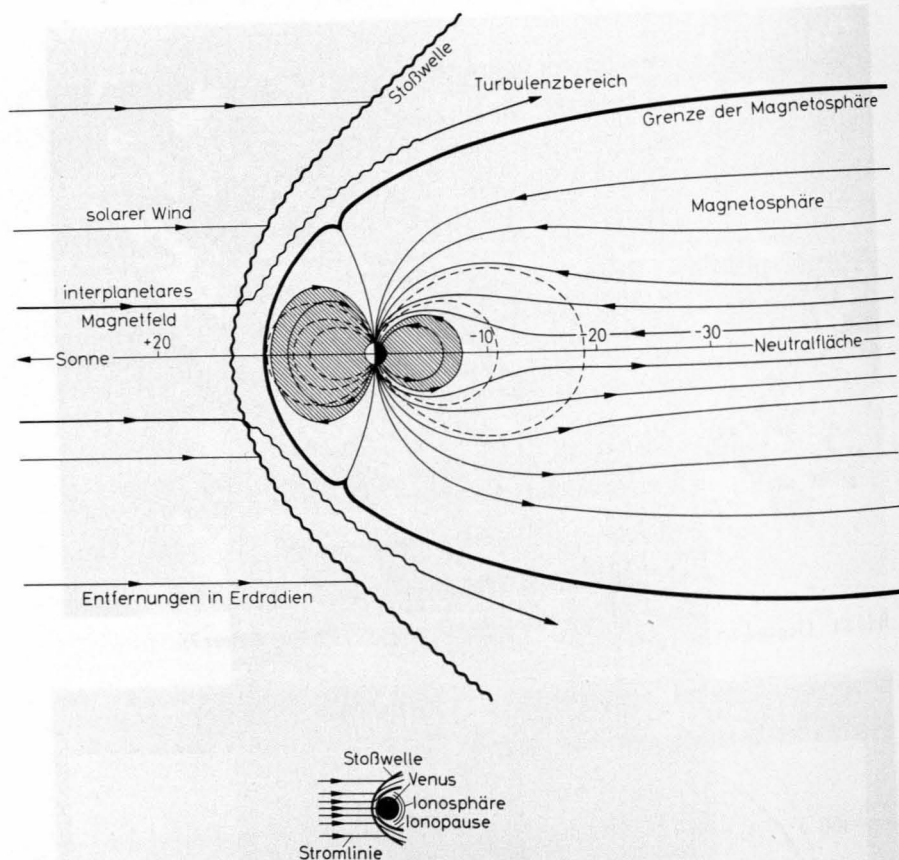


Bild 15 Vergleich der äußeren Atmosphäre von Erde und Venus (maßstäblich).

Zusammensetzung: Eisen, Silizium, Aluminium, Magnesium, Kalzium, Kalium. Wasserdampf wurde in den Morgenstunden beobachtet; er schlug sich dann in den Niederungen als Rauhreif nieder. Ganz großartig sind die Aufnahmen, die von Bord des Orbiter aufgenommen wurden. Sie zeigen eine Vielzahl von Strukturen, von denen einige in den folgenden Dias gezeigt werden sollen. Ein Vulkan mit deutlichen Auswurfspuren (Bild 18) und ein System von Cañons mit der zugehörigen Höhengauswertung. Breite des großen Cañons etwa 100 km (Bild 19). Die Pole sind entgegen früheren Annahmen nicht von  $\text{CO}_2$ -Schnee, sondern von Wassereis umgeben, das die Berge bedeckt und Gletscher und durchsichtige Adern bildet. Aufnahmen wie die folgende (Bild 20) lassen kaum eine andere Deutung zu, als daß früher erhebliche Mengen von Wasser auf der Marsoberfläche geströmt sind und sie erodiert haben. Das Wasser ist entweder versickert oder hat sich als Eis an den Polen niedergeschlagen.

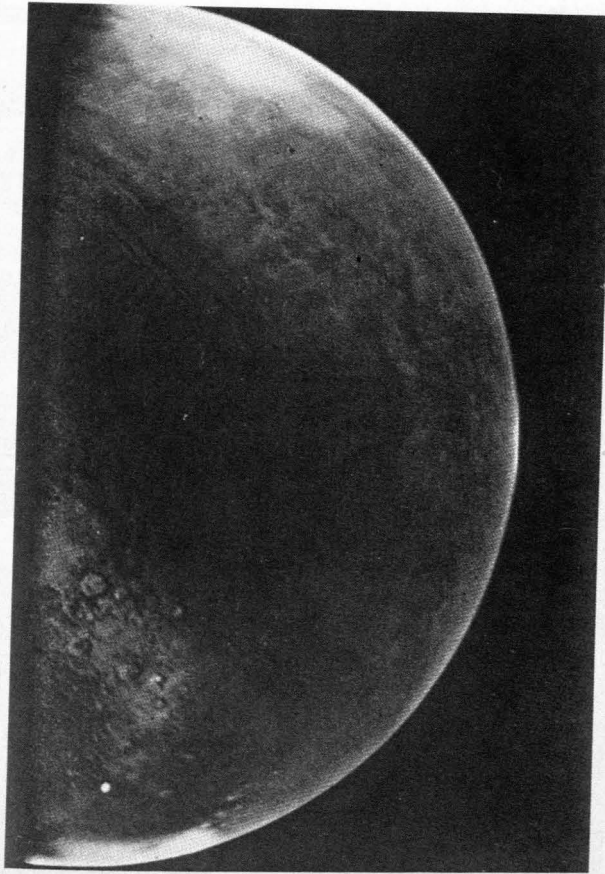


Bild 16 Marsoberfläche vom Viking-Orbiter aus.

Die Marsatmosphäre besteht zu 95% aus Kohlendioxid; ferner wurden 3% Stickstoff und etwa 2% Argon gefunden.

Die Untersuchungen, ob auf dem Mars Spuren organischen Lebens sind, haben bisher schwer deutbare Ergebnisse erbracht. Ein positiver Nachweis ist jedenfalls nicht gelungen. Das scheint die einmalige Stellung der Erde im Sonnensystem zu unterstreichen.

Auch der Mars-Mond Phobos, der nur einen Durchmesser von 18 km hat, ist photographiert worden. Neben Kratern wurde eine Streifenstruktur festgestellt, die bisher keine Deutung gefunden hat.



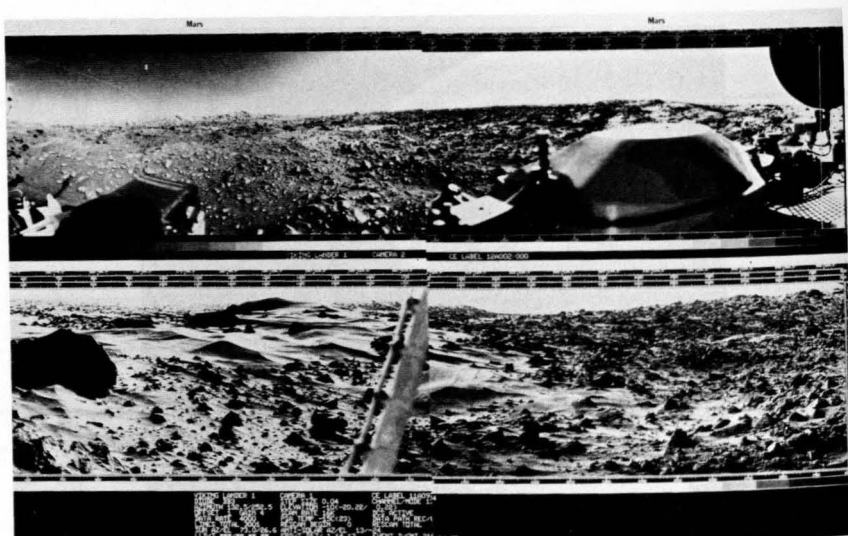


Bild 17 Panorama des Mars von der Landestelle von Viking I aus.

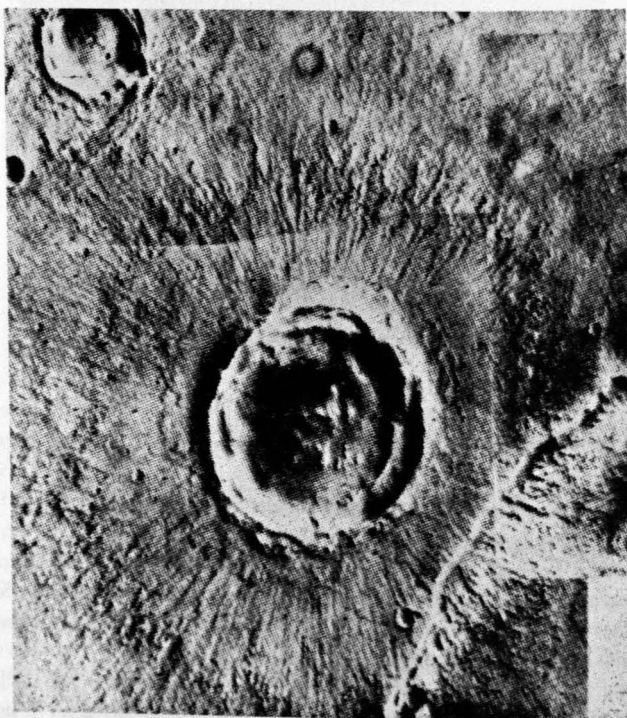


Bild 18 Jüngerer Meteoritenkrater auf Mars mit Auswurfspuren (Viking Orbiter).

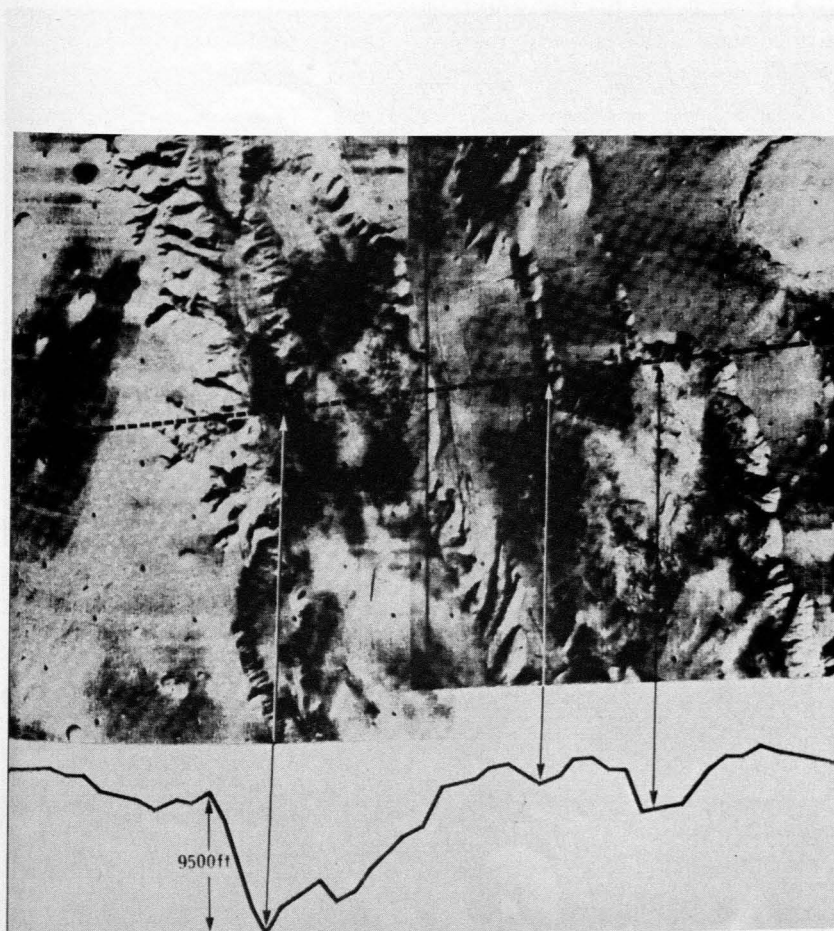


Bild 19 Mars Cañons in 75°W (Viking Orbiter) mit Höhenprofil  
(Aufnahmefeld ca. 500 × 800 km).

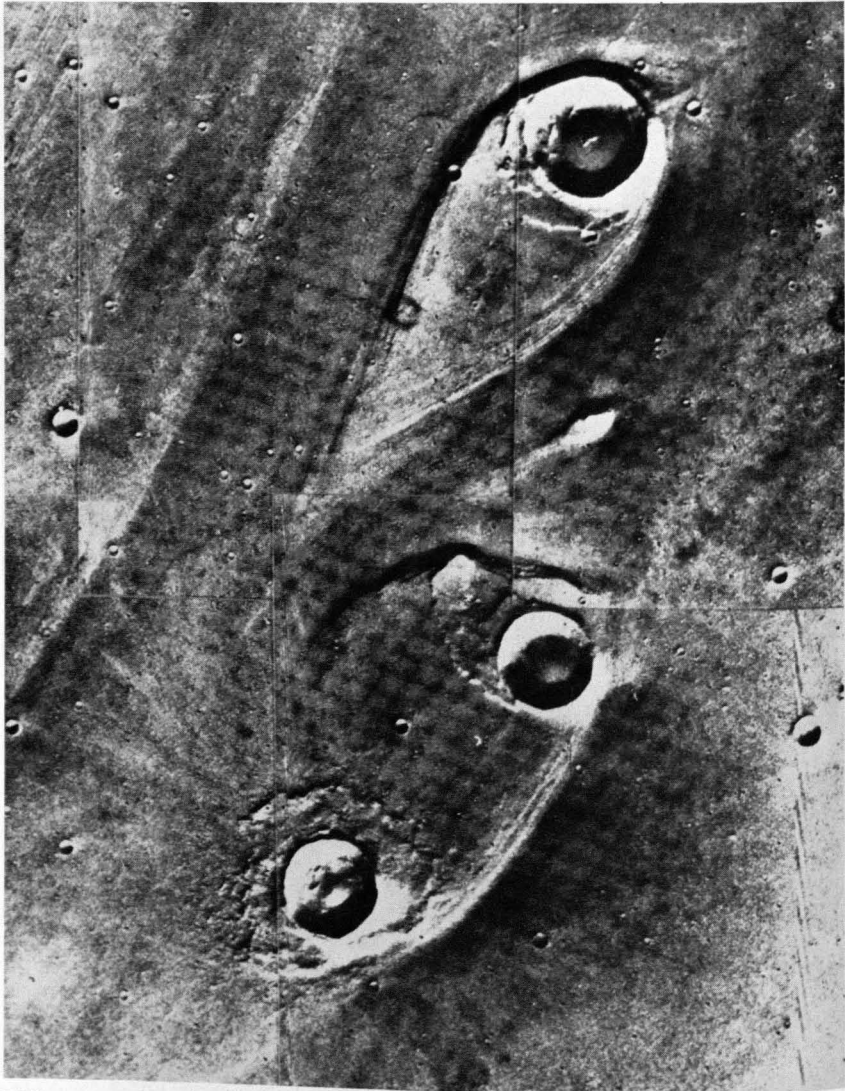


Bild 20 Erosionsspuren auf dem Mars (Viking Orbiter).

### Jupiter

Nun machen wir einen großen Sprung, sowohl was die Entfernung als auch was die Eigenschaften des nächsten Planeten angeht. Jupiter ist 5 mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Seine Umlaufzeit beträgt 9,4 Jahre, die Umdrehungszeit am Äquator 10 h 14 min. Während die Masse 318 Erdmassen beträgt, ist das Volumen 1347 mal so groß; die Dichte ist also viel geringer. Jupiter ist immer von Wolken bedeckt (Bild 21), die deutliche, mit verschiedener Geschwindigkeit rotierende Strukturen

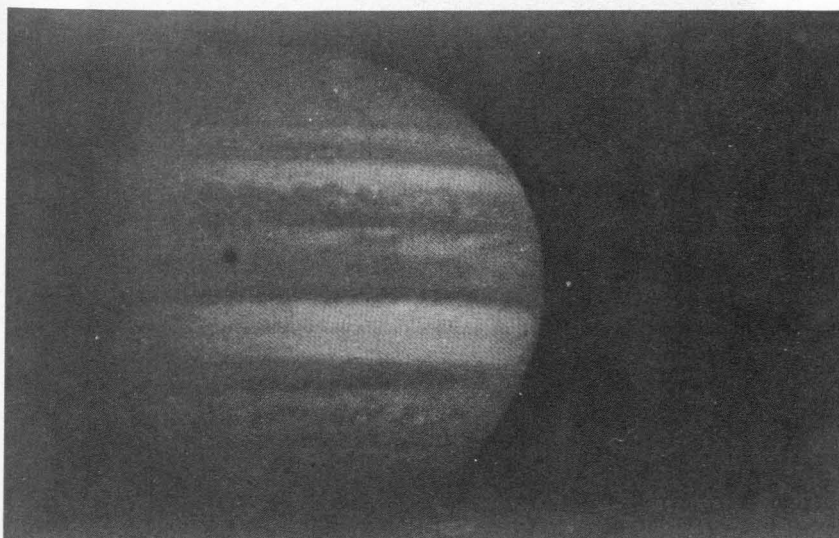


Bild 21 Wolkenoberfläche des Jupiter mit Schatten des Mondes Jo (Pionier 10).  
Jo in der rechten oberen Ecke.

besitzen. Auffallend ist ein roter Fleck (Bild 22), der entweder als schwebender Gaskörper oder ein seit mehreren Jahrhunderten bestehender Wirbel gedeutet wurde. Die Temperatur liegt mit  $-133^{\circ}\text{C}$  weit unter dem Gefrierpunkt. Die optischen Beobachtungen deuteten auf eine Wasserstoff-Ammoniak-Wasserdampf-Atmosphäre, darunter flüssigen oder festen Wasserstoff unter sehr hohem Druck. Bemerkenswert war die starke Radiostrahlung; sie ließ auf eine stark ausgebildete Magnetosphäre und ein starkes Magnetfeld schließen.

Diese Daten wurden im wesentlichen bei der Passage von Pionier 10 am 3. 12. 1975 in 130 000 km Abstand bestätigt. Man fand eine Stoßfront, die durch die Wechselwirkung zwischen Sonnenwind und jovialem Magnetfeld entsteht, in 188 Jupiterradien Abstand; das entspricht 1,7 Mio. km (Erde  $\sim 10$  Erdradien = 60 000 km). Das Magnetfeld erwies sich als doppelt so stark als vorher errechnet. Es ist 40 mal so stark wie das der Erde. Es hat die Form einer flachen Scheibe und ist  $15^{\circ}$  gegen den Äquator geneigt. Dementsprechend haben auch die riesigen Strahlungsgürtel die Form einer flachen Scheibe. Die Intensität des Teilchenflusses in ihnen, also von Elektronen und



Bild 22 Roter Fleck des Jupiter (Pionier 10).

Protonen, ist 10 000 – 1 000 000 mal so stark wie in dem irdischen Strahlungsgürtel. Die niederen Temperaturen wurden bestätigt. Sie betragen an der Oberfläche  $-173^{\circ}\text{C}$ , steigen auf  $-120^{\circ}$  an der oberen Wolkengrenze an und fallen dann auf  $-155^{\circ}\text{C}$  in 25 km Höhe ab. Jupiter besteht weitgehend aus Wasserstoff. Die Atmosphäre reicht etwa 1000 km hoch und enthält 82% Wasserstoff und 18% Helium. Eine feste Oberfläche gibt es nicht; in der Übergangszone zum flüssigen Wasserstoff beträgt die Temperatur  $2000^{\circ}\text{C}$ , 2000 km tiefer wurden  $5500^{\circ}\text{C}$  bei einem Druck von 90 000 bar berechnet. Für 24 000 km Tiefe ergibt sich eine Temperatur von  $11000^{\circ}\text{C}$  bei einem Druck von 3 Mio. bar. Unter dieser Bedingung kann nur Wasserstoff in flüssiger oder flüssig-metallischer Form existieren. Daß der Wasserstoff tatsächlich in flüssigem Zustand ist, wird auch aus dem Fehlen jeglicher Schwereanomalien gefolgert. Die erstaunliche Tatsache, daß Jupiter 3,5 mal so viel Wärme abstrahlt als er von der Sonne empfängt, kann nur durch einen Transport von Material aus dem heißen Innern in die Atmosphäre



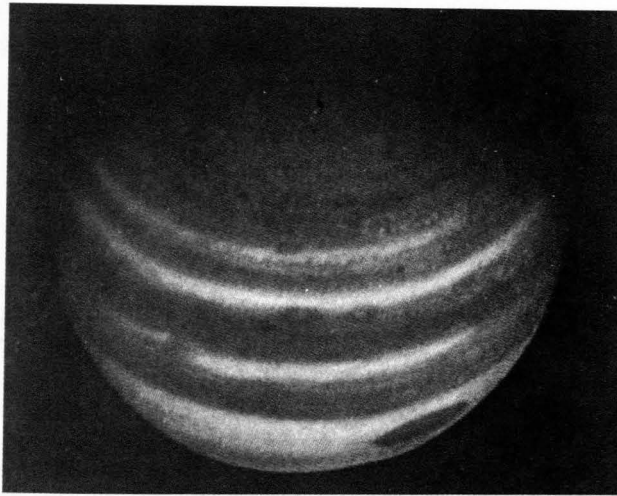


Bild 23 Wolkenstruktur vom Jupiter (Pionier 10).

in Form von Wirbeln erklärt werden, wobei es 10–100 Jahre dauert, bis das Material in die Atmosphäre gelangt. In der Atmosphäre selbst herrschen starke Vertikalströmungen. Der Rote Fleck, der eine Länge von 40 000 km hat, besteht offenbar aus Massen aufsteigender Wolken, die durch Wärmeentwicklung in die hohe Atmosphäre getrieben werden. Die hellen Streifen (Bild 23) in den hochliegenden Wolken bestehen offenbar aus Ammoniak-Eiskristallen, die dunklen, die etwa 20 km tiefer liegen, aus Ammoniak-Hydrosulfid-Kristallen. Trotz dieser exotischen Atmosphäre ist es nicht ausgeschlossen, daß in der Jupiter-Atmosphäre ammoniakresistente Bakterien leben.

Auch die Jupitermonde wurden bei der Passage neu vermessen. Der innerste Mond ist mit 1,22 Mondmassen 23% schwerer als früher angenommen. Seine Dichte von 3,5 läßt darauf schließen, daß er im Gegensatz zu den anderen Monden aus Gestein besteht. Seine unwirtliche Atmosphäre besteht aus Schwefel, Wasserstoff und Stickstoff.

Die Erforschung der fernen Planeten ist der Zukunft vorbehalten. Der Uranus ist das Ziel einer Sonde, die am 3. November 1979 gestartet, den Jupiter am 10.4.1981 in 320 000 km Abstand passieren und 1985 den Uranus erreichen soll.

Zum Schluß sei noch die Frage gestellt, ob sich aus den bisherigen Beobachtungen Schlüsse auf die Entstehung der inneren Planeten und der Monde ziehen lassen. Wenn die Antwort darauf auch noch nicht einheitlich und unbestritten ist, so läßt sich doch folgender Werdegang vermuten:

Zunächst kondensierte sich die kalte interplanetare Materie zu Körpern sehr verschiedener Größe. Die größeren bildeten die Monde und Planeten, die kleineren eine große Zahl von Meteoriten, die allmählich von den größeren Körpern eingefangen wurden und Krater sehr verschiedener Größe auf der Oberfläche der größeren Körper hinterließen. Dies dürfte zwischen  $4,5$  und  $4 \cdot 10^9$  a erfolgt sein. Das Bombardement war offenbar so heftig, daß sich die Oberfläche in der Zeit zwischen  $3$  und  $4 \cdot 10^9$  a bis

zur Schmelztemperatur erhitzte. Mit dem Abnehmen der Meteoriten trat Abkühlung und Verfestigung der Oberflächen ein. In dieser Oberfläche entstanden durch weiteren Meteoriteneinfall weitere Krater sehr verschiedener Größe.

In der zweiten Phase begann sich der Kern der Himmelskörper durch radioaktive Prozesse zu erwärmen und zu schmelzen. Das flüssige Magma ergoß sich durch Spalten speziell in die großen Becken, die durch Einschlag von Meteoriten von einigen 100 km Durchmesser entstanden waren.

Die weitere Entwicklung hing von der Größe der Körper ab. Je kleiner, desto schneller war die radioaktive Energie verbraucht und desto früher erstarrte die Oberfläche. Bei den kleinen Monden wie Deimos und Phobos trat die Aufschmelzung überhaupt nicht auf, sie tragen noch alle Spuren der Meteoriten-Einschläge. Beim Mond erstarrte die Kruste frühzeitig und die Oberfläche wurde durch weitere Meteoriteneinschläge zu dem, was der Fachmann Regolith nennt, zertrümmert. Wegen des Fehlens einer Atmosphäre trat keinerlei Erosion auf und der Vulkanismus erlosch wegen der dicken Kruste frühzeitig. Die Oberfläche wurde nur noch durch die seltener werdenden Meteoriteneinschläge verändert. Bei Merkur hielt die Konkurrenz zwischen Kraterbildung und Aufschmelzen länger an. Nach der Verfestigung erfolgte die Kraterbildung nur noch mit der stark reduzierten Rate, wie sie etwa heute üblich ist. Bei Venus, Mars und Erde spielen Tektonik, Vulkanismus und Erosion für die weitere Entwicklung eine wichtige Rolle, jedoch in sehr verschiedenem Maße. Während auf der Erde alle alten Krater durch Tektonik und Erosion zerstört sind und offenbar nur solche, die jünger als 1 Mrd. Jahre sind, z.B. auf dem canadischen Schild erhalten blieben, trägt Mars noch etwa auf der Hälfte der Oberfläche die Spuren sehr alter Einschläge. Die Spuren von Erosion durch Wind und strömendes Wasser sind unverkennbar. Warum das Wasser auf Mars verschwunden ist, ist noch rätselhaft. Auf der Venus sind die großen Krater etwa so häufig wie auf den älteren Teilen des Mars, kleinere sind offenbar durch Erosion und Tektonik stark reduziert.

Mit dieser Übersicht möchte ich meinen Bericht beenden.

Fragt man sich abschließend, ob die erzielten Ergebnisse die außerordentlich hohen Aufwendungen an Geld und Arbeitskraft für die Raumfahrt erkundung gerechtfertigt haben, so möchte ich sagen: Für die unbemannte Raumfahrt: ja, für die bemannte: nein. Aber das ist meine subjektive Meinung und ich bin mir darüber klar, daß viele die Frage anders beantworten.

### Literatur

- Hartmann, W. K., Cratering in the Solar System. *Scientific American* 235, 84, 1977.  
 Kopal, Z., *The Solar System*. Oxford University Press, London, Oxford, New York 1972.  
 Smith, E. V. P. and Kenneth, C. J., *Introductory Astronomy and Astrophysics*, W. B. Saunders Company, Philadelphia London Toronto, 1973.  
 Jastron, R. and Thomson, M. H., *Astronomy: Fundamentals and Frontiers*. John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sidney, Toronto, 1974.  
 Kurznachrichten aus Forschung und Entwicklung. *Raumfahrtforschung* 1974–1977.  
 Bernatowicz, T. and Poupeau, G., *Le volcanisme lunaire*, *La Recherche* 7, 959, 1976.  
 Köhler, H. W., *Himmelskörper in Farbe*. *Phys. Blätter* 33, 17, 1977.